

(19) 日本国特許庁 (J P)

(12) 公 開 特 許 公 報 (A)

(11) 特許出願公開番号

特開平10-51074

(43) 公開日 平成10年(1998) 2月20日

(51) Int.Cl. <sup>6</sup>	識別記号	庁内整理番号	F I	技術表示箇所
H 0 1 S 3/18			H 0 1 S 3/18	
H 0 1 L 33/00			H 0 1 L 33/00	C

審査請求 未請求 請求項の数 5 O L (全 6 頁)

(21) 出願番号 特願平8-204471

(22) 出願日 平成8年(1996) 8月2日

(71) 出願人 000005223

富士通株式会社

神奈川県川崎市中原区上小田中4丁目1番  
1号

(72) 発明者 堂免 恵

神奈川県川崎市中原区上小田中4丁目1番  
1号 富士通株式会社内

(74) 代理人 弁理士 柏谷 昭司 (外2名)

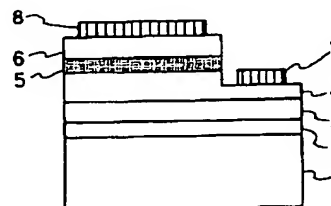
(54) 【発明の名称】 半導体発光素子

(57) 【要約】

【課題】 半導体発光素子に関し、レーザ発振に必要なしきい値電流密度を低減する。

【解決手段】 基板1上に低温バッファ層2を設けるとともに、低温バッファ層2の直上に設ける成長層3をInGa<sub>x</sub>N<sub>1-x</sub>、AlIn<sub>x</sub>N<sub>1-x</sub>、或いは、AlGaIn<sub>x</sub>N<sub>1-x</sub>のいずれかとし、且つ、成長層3の格子定数を活性層5の格子定数より大きくする。

本発明の原理的構成の説明図



1: 基板  
2: 低温バッファ層  
3: 成長層  
4: 障壁層  
5: 活性層  
6: 障壁層  
7: 電極  
8: 電極

## 【特許請求の範囲】

【請求項1】 基板上に低温バッファ層を設けるとともに、前記低温バッファ層の直上に設ける成長層をInGa<sub>0.1</sub>N、AlInN、或いは、AlGaInNのいずれかとし、且つ、前記成長層の格子定数を活性層の格子定数より大きくすることを特徴とする半導体発光素子。

【請求項2】 上記成長層が障壁層を構成し、且つ、Ga<sub>0.1</sub>Nからなる活性層とによってダブルヘテロ接合構造を構成することにより、前記活性層に引張歪みを導入したことを特徴とする請求項1記載の半導体発光素子。

【請求項3】 上記成長層上にAlGa<sub>0.1</sub>N、AlInN、或いは、AlGaInNのいずれかからなる障壁層を形成し、且つ、Ga<sub>0.1</sub>Nからなる活性層とによってダブルヘテロ接合構造を構成することにより、前記活性層に引張歪みを導入したことを特徴とする請求項1記載の半導体発光素子。

【請求項4】 上記成長層上にAlGa<sub>0.1</sub>N、AlInN、或いは、AlGaInNのいずれかからなる障壁層を形成し、且つ、InGa<sub>0.1</sub>Nからなる活性層とによってダブルヘテロ接合構造を構成することにより、前記活性層に引張歪みを導入したことを特徴とする請求項1記載の半導体発光素子。

【請求項5】 上記活性層の導入される引張歪みが、1.0%以下であることを特徴とする請求項2乃至4のいずれか1項に記載の半導体発光素子。

## 【発明の詳細な説明】

## 【0001】

【発明の属する技術分野】本発明は半導体発光素子に関するものであり、特に、Ga<sub>0.1</sub>N系化合物半導体からなる活性層に引張歪みを導入した短波長半導体レーザ等の半導体発光素子に関するものである。

## 【0002】

【従来の技術】近年、青色から近紫外領域に波長を有する短波長半導体レーザの開発が盛んであり、青色半導体レーザ用材料としては、II-VI族化合物半導体のZnSe系と、III-V族化合物半導体のGa<sub>0.1</sub>N系とが研究されている。

【0003】この内、ZnSe系は高品質の基板として実績の高いGaAsにほぼ格子整合することから、長い間ZnSe系の方が有利であると考えられ、世界中の研究者の大半がこのZnSe系の研究に従事していたという経緯があり、レーザの研究に関してはZnSe系の方が先んじている。

【0004】このZnSe系については、既に、注入励起による室温連続発振が報告されているが、本質的に劣化しやすい材料であることから信頼性が問題となり、未だ実用化には至っていない。

【0005】一方、Ga<sub>0.1</sub>N系の場合には、2年前の日亜化学によるGa<sub>0.1</sub>N高輝度LEDの発表を境に、ZnSe系でネックになっている信頼性に関して耐環境性に優れ

るGa<sub>0.1</sub>Nが見直され、世界中で研究者の大きな増加を見ている。

【0006】このGa<sub>0.1</sub>N系化合物半導体は、ウルツ鉱型化合物半導体であるため、類似の結晶構造を有する六方晶系のサファイア基板或いは6H-SiC基板上にMOVPE法（有機金属気相成長法）を用いてエピタキシャル成長させていたので、ここで、図4を参照して従来の短波長発光素子を説明する。

## 【0007】図4（a）参照

まず、（0001）面を主面とするサファイア基板21上に、Ga<sub>0.1</sub>N低温バッファ層22を介して、n型Al<sub>0.1</sub>Ga<sub>0.9</sub>Nクラッド層23、n型Ga<sub>0.1</sub>N光ガイド層24、In<sub>0.1</sub>Ga<sub>0.9</sub>N活性層25、p型Ga<sub>0.1</sub>N光ガイド層26、及び、p型Al<sub>0.1</sub>Ga<sub>0.9</sub>Nクラッド層27をMOVPE法によってエピタキシャル成長させたのち、エッチングによりn型Al<sub>0.1</sub>Ga<sub>0.9</sub>Nクラッド層23の一部を露出させて、Ti/Au電極28からなるn側電極を設けると共に、p型Al<sub>0.1</sub>Ga<sub>0.9</sub>Nクラッド層27上にはNi/Au電極29からなるp側電極を設けていた。

## 【0008】

【発明が解決しようとする課題】しかし、従来の短波長発光素子の場合、光励起による発振の報告から、しきい値電流密度が大きいことが指摘されており、ごく最近の注入励起によるレーザ発振の成功の報告（必要ならば、S. Nakamura et al., Japanese Journal of Applied Physics, vol 35, p. L74, 1996参照）においても、しきい値電流密度が4kA/cm<sup>2</sup>以上とされている。

【0009】また、理論計算からも、バンドの有効質量が大きいことなどから、同じくしきい値電流密度が非常に大きくなることが予測されているので、ここで、図4（b）を参照して、Ga<sub>0.1</sub>N系化合物半導体のバンド構造を説明する。

## 【0010】図4（b）参照

Ga<sub>0.1</sub>N系化合物半導体においては、価電子帯におけるホールからみてエネルギー的に一番低いバンド、即ち、HH（Heavy Hole）とLH（Light Hole）が2重に縮退し、スピン軌道相互作用による分だけエネルギー的に分離しており、また、それ以外に、Ga<sub>0.1</sub>N系化合物半導体に特有なCHというバンドが現れる。

【0011】一方、最近の研究により、本出願人は、上述の従来の短波長発光素子においては、n型Al<sub>0.1</sub>Ga<sub>0.9</sub>Nクラッド層23乃至p型Al<sub>0.1</sub>Ga<sub>0.9</sub>Nクラッド層27の面内格子定数が、Ga<sub>0.1</sub>N低温バッファ層22の直上のn型Al<sub>0.1</sub>Ga<sub>0.9</sub>Nクラッド層23の格子定数で規定されることをつきとめた。

【0012】したがって、n型Al<sub>0.1</sub>Ga<sub>0.9</sub>Nクラ

ッド層23上にコヒーレントに成長したn型Ga<sub>0.9</sub>In<sub>0.1</sub>N活性層25、及び、p型Ga<sub>0.9</sub>In<sub>0.1</sub>N光ガイド層26は格子不整及び熱膨張係数差により、(0001)面内で圧縮応力を受けることになる。

【0013】この圧縮応力の場合には、CHバンドのホールからみたエネルギーがHHバンド、LHバンドに対して相対的にさらに高いバンド構造となるだけで、価電子帯のエネルギー的に一番低いバンドは2重に縮退したままであり、このようなGa<sub>0.9</sub>In<sub>0.1</sub>N系化合物半導体ではレーザ発振させるためには、縮退しているHH、LHの二つのバンドをキャリアで満たす必要があり、レーザ発振をさせるためのしきい値電流密度が高いという問題があった。

【0014】したがって、本発明は、Ga<sub>0.9</sub>In<sub>0.1</sub>N系化合物半導体を用いた半導体発光素子、特に、短波長半導体レーザにおいて、レーザ発振に必要なしきい値電流密度を低減することを目的とする。

【0015】

【課題を解決するための手段】図1は本発明の原理的構成の説明図であり、また、図2はGa<sub>0.9</sub>In<sub>0.1</sub>Nの価電子帯のバンド構造の歪み依存性の説明図であり、この図1及び図2を参照して本発明における課題を解決するための手段を説明する。

図1参照

(1) 本発明は、半導体発光素子において、基板1上に低温バッファ層2を設けるとともに、低温バッファ層2の直上に設ける成長層3をInGa<sub>0.9</sub>N、AlIn<sub>0.1</sub>N、或いは、AlGa<sub>0.9</sub>In<sub>0.1</sub>Nのいずれかとし、且つ、成長層3の格子定数を活性層5の格子定数より大きくすることを特徴とする。

【0016】上述のように、本出願人は、サファイアの(0001)面を主面とした基板1を用いてGa<sub>0.9</sub>In<sub>0.1</sub>N系化合物半導体を成長させた場合、各層の格子定数は、低温バッファ層2の直上に設けた成長層3の格子定数によって規定されることを発見したので、低温バッファ層2の直上に設ける成長層3をInGa<sub>0.9</sub>N、AlIn<sub>0.1</sub>N、或いは、AlGa<sub>0.9</sub>In<sub>0.1</sub>Nのいずれかとし、且つ、成長層3の格子定数を活性層5の格子定数より大きくすることにより、青色発光に適した禁制帯幅を有する活性層5に引張歪みを導入することができる。

【0017】一方、バンド構造の歪み依存性の理論計算からは、引張歪みの導入により、バンド端を形成するのがCHバンドのみとなるため、活性層5に引張歪みを導入することによって、しきい値電流密度を低減させることが可能になる。

【0018】図2参照

図2から明らかなように、従来の様に無歪み或いは圧縮歪みの場合には、ホールから見て最低位にあるHHバンドとLHバンドは縮退した状態であるが、引張歪みを導

入することによって、CHバンドがエネルギー的に降下してCHバンドのみによってバンド端を形成することになり、レーザ発振させるためには、CHバンドのみをキャリアで満たせば良いので、しきい値電流密度が低減する。

【0019】なお、図2においては、破線の円で示す領域においては、波動関数の結合が大きくなり、LHバンドとCHバンドの波動関数が入れ代わる形になって、CHバンドがエネルギー的に最低位(図面としては最上位)に移行することになる。

【0020】(2) また、本発明は、上記(1)において、成長層3が障壁層4を構成し、且つ、Ga<sub>0.9</sub>In<sub>0.1</sub>Nからなる活性層5とによってダブルヘテロ接合構造を構成することにより、活性層5に引張歪みを導入したことを特徴とする。

【0021】この様に、障壁層4、即ち、クラッド層として成長層3自体を用いることにより、製造工程が簡素化される。

【0022】(3) また、本発明は、上記(1)において、成長層3上にAlGa<sub>0.9</sub>N、AlIn<sub>0.1</sub>N、或いは、AlGa<sub>0.9</sub>In<sub>0.1</sub>Nのいずれかからなる障壁層4、6を形成し、且つ、Ga<sub>0.9</sub>In<sub>0.1</sub>Nからなる活性層5とによってダブルヘテロ接合構造を構成することにより、活性層5に引張歪みを導入したことを特徴とする。

【0023】この様に、障壁層4、6を成長層3とは別個の層で構成することにより、特定の格子定数を有するクラッド層を、任意の禁制帯幅のGa<sub>0.9</sub>In<sub>0.1</sub>N系化合物半導体によって構成することができる。

【0024】(4) また、本発明は、上記(1)において、成長層3上にAlGa<sub>0.9</sub>N、AlIn<sub>0.1</sub>N、或いは、AlGa<sub>0.9</sub>In<sub>0.1</sub>Nのいずれかからなる障壁層4、6を形成し、且つ、InGa<sub>0.9</sub>Nからなる活性層5とによってダブルヘテロ接合構造を構成することにより、活性層5に引張歪みを導入したことを特徴とする。

【0025】この様に、障壁層4、6を成長層3とは別個の層、特に、活性層5より格子定数が小さく、通常ならば圧縮歪みを導入する層で構成しても、活性層5に引張歪みを導入することができる。

【0026】(5) また、本発明は、上記(2)ないし(4)のいずれかにおいて、活性層5に導入される引張歪みが1.0%以下であることを特徴とする。

【0027】上述の様に、しきい値電流密度を低減するために引張歪みは必要であるが、あまり、歪みが大きくと、即ち、格子定数が異なりすぎると転位が発生しやすくなり、結晶性が劣化するので、引張歪みの大きさは1.0%以下が適当である。

【0028】

【発明の実施の形態】図3を参照して、本発明の実施の形態を説明する。

図3参照

まず、(0001)面を主面とするサファイア基板11

上に、TMGa(トリメチルガリウム)を10~100  $\mu\text{mol}/\text{分}$ 、例えば、45  $\mu\text{mol}/\text{分}$ 、アンモニアを0.02~0.2  $\text{mol}/\text{分}$ 、例えば、0.1  $\text{mol}/\text{分}$ 、及び、キャリアガスとしての水素を300~3000  $\text{sccm}$ 、例えば、1000  $\text{sccm}$ を流し、成長圧力を70~760 Torr、例えば、100 Torrとし、成長温度を400~800℃、例えば、500℃とした状態で、厚さ100~1000 Å、例えば、500 ÅのGaN低温バッファ層12を成長させる。

【0029】引き続き、TMGaを2.5~25  $\mu\text{mol}/\text{分}$ 、例えば、10  $\mu\text{mol}/\text{分}$ 、TMIn(トリメチルインジウム)を25~250  $\mu\text{mol}/\text{分}$ 、例えば、100  $\mu\text{mol}/\text{分}$ 、アンモニアを0.02~0.2  $\text{mol}/\text{分}$ 、例えば、0.1  $\text{mol}/\text{分}$ 、及び、キャリアガスとしての $\text{N}_2$ を300~3000  $\text{sccm}$ 、例えば、1000  $\text{sccm}$ を流し、成長圧力を70~760 Torr、例えば、100 Torrとし、成長温度を550~800℃、例えば、650℃とした状態で、厚さ0.1~2.0  $\mu\text{m}$ 、例えば、0.5  $\mu\text{m}$ の $\text{In}_{0.08}\text{Ga}_{0.92}\text{N}$ バッファ層13を成長させる。

【0030】引き続き、TMAI(トリメチルアルミニウム)を10~100  $\mu\text{mol}/\text{分}$ 、例えば、45  $\mu\text{mol}/\text{分}$ 、TMGaを10~100  $\mu\text{mol}/\text{分}$ 、例えば、45  $\mu\text{mol}/\text{分}$ 、アンモニアを0.02~0.2  $\text{mol}/\text{分}$ 、例えば、0.1  $\text{mol}/\text{分}$ 、ドーパントとして、 $\text{Si}_2\text{H}_6$ を0.0001~0.002  $\mu\text{mol}/\text{分}$ 、例えば、0.0007  $\mu\text{mol}/\text{分}$ 、及び、キャリアガスとしての $\text{H}_2$ を300~3000  $\text{sccm}$ 、例えば、1000  $\text{sccm}$ を流し、成長圧力を70~760 Torr、例えば、100 Torrとし、成長温度を850~1100℃、例えば、950℃とした状態で、厚さ0.5~2.5  $\mu\text{m}$ 、例えば、1.0  $\mu\text{m}$ のn型 $\text{Al}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{N}$ クラッド層14を成長させる。

【0031】引き続き、TMGaを10~100  $\mu\text{mol}/\text{分}$ 、例えば、45  $\mu\text{mol}/\text{分}$ 、アンモニアを0.02~0.2  $\text{mol}/\text{分}$ 、例えば、0.1  $\text{mol}/\text{分}$ 、及び、キャリアガスとしての水素を300~3000  $\text{sccm}$ 、例えば、1000  $\text{sccm}$ を流し、成長圧力を70~760 Torr、例えば、100 Torrとし、成長温度を800~1050℃、例えば、930℃とした状態で、厚さ3~100 nm、例えば、30 nmのGaN活性層15を成長させる。

【0032】引き続き、TMAIを10~100  $\mu\text{mol}/\text{分}$ 、例えば、45  $\mu\text{mol}/\text{分}$ 、TMGaを10~100  $\mu\text{mol}/\text{分}$ 、例えば、45  $\mu\text{mol}/\text{分}$ 、アンモニアを0.02~0.2  $\text{mol}/\text{分}$ 、例えば、0.1  $\text{mol}/\text{分}$ 、ビスシクロペンタジエニルマグネシウムを0.01~0.5  $\mu\text{mol}/\text{分}$ 、例えば、0.05  $\mu\text{mol}/\text{分}$ 、及び、キャリアガスとしての $\text{H}_2$ を300~3000  $\text{sccm}$ 、例えば、1000  $\text{sccm}$ を流

し、成長圧力を70~760 Torr、例えば、100 Torrとし、成長温度を850~1100℃、例えば、950℃とした状態で、厚さ0.5~2.0  $\mu\text{m}$ 、例えば、1.0  $\mu\text{m}$ のp型 $\text{Al}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{N}$ クラッド層16を成長させる。

【0033】次いで、反応性イオンエッチング(RIE)によって、p型 $\text{Al}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{N}$ クラッド層16乃至n型 $\text{Al}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{N}$ クラッド層14の一部をエッチングし、露出したn型 $\text{Al}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{N}$ クラッド層14にn側電極としてのTi/Au電極17を設け、一方、p型 $\text{Al}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{N}$ クラッド層16上にはp側電極としてNi/Au電極18を設ける。

【0034】次いで、同じく、反応性イオンエッチングによって、端面をエッチングすることによって、一对の平行なエッチング端面を形成して、共振器ミラーとする。

【0035】この場合、各層の面内の原子間隔は、 $\text{In}_{0.08}\text{Ga}_{0.92}\text{N}$ バッファ層13のa軸の格子定数3.218 Åで規定されるため、a軸の格子定数が3.189 ÅであるGaN活性層14には0.9%の引張歪みが導入され、CHバンドが最上位に来ることになり、このCHバンドと伝導帯との間の遷移によってレーザ発振が行われることになり、しきい値電流密度が低減することになる。

【0036】なお、上記の実施の形態においては、低温バッファ層としてGaN低温バッファ層を用いているが、AlN等の他のナイトライド系化合物半導体を用いても良いものである。

【0037】また、GaN低温バッファ層12の直上に設けるバッファ層は、 $\text{In}_{0.08}\text{Ga}_{0.92}\text{N}$ バッファ層13である必要はなく、他の組成のInGaNバッファ層や、AlInNバッファ層或いはAlInGaNバッファ層を用いても良いものであるが、その格子定数は、青色発光に適したGaN或いはInGaN活性層に1.0%以下の適当な大きさの引張歪みを与えるために、活性層の格子定数より大きい必要がある。

【0038】また、上記の実施の形態においては、活性層としてGaNを用いているが、必要とする波長に応じて混晶比を $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x-y}\text{In}_y\text{N}$  ( $0 \leq x \leq 1$ ,  $0 \leq y \leq 1$ )の範囲内で変えても良いものであり、且つ、それに伴って、光ガイド層及びクラッド層の混晶比を $\text{Al}_a\text{Ga}_{1-a-b}\text{In}_b\text{N}$  ( $0 \leq a \leq 1$ ,  $0 \leq b \leq 1$ )の範囲内で変えても良い。

【0039】例えば、 $\text{Al}_{0.4}\text{Ga}_{0.3}\text{In}_{0.3}\text{N}$ クラッド層と $\text{In}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{N}$ 活性層の組合せを用いても良く、この場合には、 $\text{Al}_{0.4}\text{Ga}_{0.3}\text{In}_{0.3}\text{N}$ クラッド層のa軸の格子定数は3.266 Åとなり、a軸の格子定数が3.225 Åである $\text{Ga}_{0.9}\text{In}_{0.1}\text{N}$ 活性層より大きくなる。なお、 $\text{Ga}_{0.9}\text{In}_{0.1}\text{N}$ 、及び、 $\text{Al}_{0.4}\text{Ga}_{0.3}\text{In}_{0.3}\text{N}$ のエネルギーギャップは、

それぞれ3.15eV、及び、3.6eVである。

【0040】また、上記の実施の形態においては光ガイド層を用いていないが、必要によって設けても良いものであり、クラッド層と活性層との間の禁制帯幅を有するGaN系化合物半導体を用いれば良い。

【0041】さらに、上記の実施の形態は、半導体レーザであるものの、半導体レーザに限られるものでなく、通常の発光ダイオード(LED)も対象とするものであり、この場合には、エッチング端面を形成する必要はない。

【0042】

【発明の効果】本発明によれば、GaN系化合物半導体からなる短波長半導体発光素子を、低温バッファ層の直上に設けた格子定数が活性層の格子定数より大きな成長層を介して設けているので、GaN活性層或いはInGaN活性層には適当な大きさの引張歪みが導入され、CHバンドがバンド端になるのでしきい値電流密度を低減することができ、光情報記録装置等の光源としてその高密度化に寄与するところが大きい。

【図面の簡単な説明】

【図1】本発明の原理的構成の説明図である。

【図2】GaNの価電子帯のバンド構造の歪み依存性の説明図である。

【図3】本発明の実施の形態の説明図である。

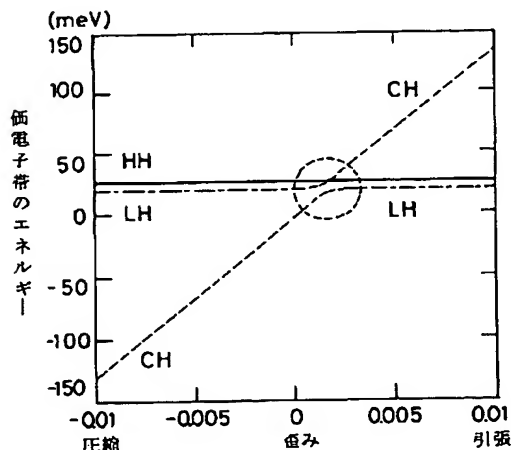
【図4】従来の短波長発光素子の説明図である。

【符号の説明】

- 1 基板
- 2 低温バッファ層
- 3 成長層
- 4 障壁層
- 5 活性層
- 6 障壁層
- 7 電極
- 8 電極
- 11 サファイア基板
- 12 GaN低温バッファ層
- 13  $\text{In}_{0.08}\text{Ga}_{0.92}\text{N}$  バッファ層
- 14 n型 $\text{Al}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{N}$  クラッド層
- 15 GaN活性層
- 16 p型 $\text{Al}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{N}$  クラッド層
- 17 Ti/Au電極
- 18 Ni/Au電極
- 21 サファイア基板
- 22 GaN低温バッファ層
- 23 n型 $\text{Al}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{N}$  クラッド層
- 24 n型GaN光ガイド層
- 25  $\text{In}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{N}$  活性層
- 26 p型GaN光ガイド層
- 27 p型 $\text{Al}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{N}$  クラッド層
- 28 Ti/Au電極
- 29 Ni/Au電極

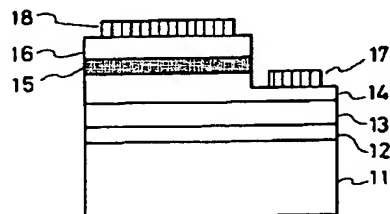
【図2】

GaNの価電子帯のバンド構造の歪み依存性の説明図



【図3】

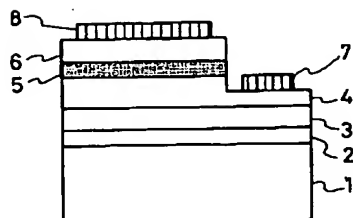
本発明の実施の形態の説明図



- 11: サファイア基板
- 12: GaN低温バッファ層
- 13:  $\text{In}_{0.08}\text{Ga}_{0.92}\text{N}$  バッファ層
- 14: n型 $\text{Al}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{N}$  クラッド層
- 15: GaN活性層
- 16: p型 $\text{Al}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{N}$  クラッド層
- 17: Ti/Au電極
- 18: Ni/Au電極

【図1】

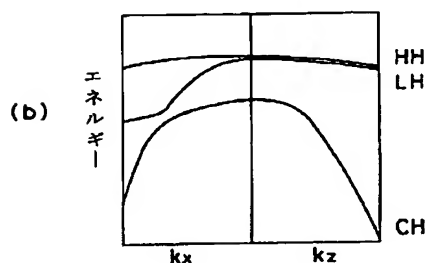
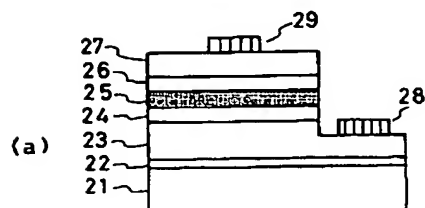
本発明の原理的構成の説明図



- 1: 基板  
2: 低温バッファ層  
3: 成長層  
4: 障壁層  
5: 活性層  
6: 障壁層  
7: 電極  
8: 電極

【図4】

従来の短波長発光素子の説明図



- 21: サファイア基板  
22: GaN低温バッファ層  
23: n型 $\text{Al}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{N}$ クラッド層  
24: n型GaN光ガイド層  
25:  $\text{In}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{N}$ 活性層  
26: p型GaN光ガイド層  
27: p型 $\text{Al}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{N}$ クラッド層  
28: Ti/Au電極  
29: Ni/Au電極